琉球大学
University of the Ryukyus

Title	サンゴ礁における炭酸系ダイナミクスと地球環境の関係(1) 瀬底島サンゴ礁における炭酸系ダイナミクスの時系列観測)
Author(s)	大森, 保; 新垣, 雄光; 又吉, 直子; 棚原, 朗
Citation	
Issue Date	2005-06-20
URL	http://ir.lib.u-ryukyu.ac.jp/handle/123456789/11327
Rights	

琉球大学学術リポジトリ
University of the Ryukyus Repository
琉球大学学術リポジトリ
University of the Ryukyus Repository

5．研究成果

5－1　調査概要

1）　瀬底島サンゴ礁における炭酸系ダイナミクスの時系列観測

平成 15 年度　炭酸システムおよび過酸化物濃度の時系列観測
（藤村弘行・渡慶次亮子 M2・谷口耕平 B4）

平成 16 年度　炭酸システムおよび過酸化物濃度の時系列観測
（藤村弘行・桑野多恵子 B4）

2000 年より琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底実験所前のサンゴ礁において炭酸系の時系列観測を、水質ゾンデによる長期観測と長期観測データの校正を目的とした短期精密測定を組み合わせて継続的に実施した。

1）長期観測

水質ゾンデ（溶存酸素、ｐＨ、水温、塩分、水深）、電磁流速計（流向、流速）および気象計（風向、風速、光量、気温）を用いて、15 分毎にデータを取得した。3-4 週間ごとにデータ回収と機器のメンテナンスを行った。

水質ゾンデ（YSI-6600 型）

電磁流速計（COMPACT-EM　AEM-HR 型）

気象計（Onset　HOBO　Weather Station)

毎週 2 回ずつ海水のサンプリングと炭酸系の計算に必要なパラメーター成分の精密化学分析をおこない、ゾンデによる観測データの規格化をおこなった。

2）短期観測

2003 年 1 月 19 日 14 時から 1 月 20 日 14 時まで、および 2003 年 10 月 23 日 10 時から 26 日 6 時まで、2 時間おきに海水のサンプリングをおこなった。

海水について、溶存酸素、pH、アルカリ度、全炭酸、塩分の精密化学分析をおこなった。大気および海水中の二酸化炭素濃度は、非分散型赤外線ガス分析装置（NDIR: LI-COR LI-6252 型 CO2 Analyzer)および気液平衡器を用いて測定した。NDIR の校正には、空気ベースの二酸化炭素標準ガス（356ppm、日本酸素）とゼロガス（窒素ガス）を用いて行った。

＝瀬底島サンゴ礁観測結果・抜粋＝

第３章　観測とデータ

観測は沖縄県瀬底島にある琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底実験所の沿岸海域(桟橋先)〔Fig. 1〕において実施した。本研究では、長期観測に用いる水質計データの精密計測を確認するために、2002 年 12 月から 2003 年 11 月の間に、長期観測(約 1 年間)に対して短期観測を 2 回(24 時間、70 時間測定)行った。観測項目は、炭酸系成分を定性的に求めるために必要な水温、塩分、溶存酸素、pH、全アルカリ度と、それを定量的に求めるために必要な水深、流向・流速、そしてその変動を把握するための環境調査として風向・風速、光量、気温について観測を行った。この章では短期及び長期の海洋観測とそのデータについて記す。

３－1. 長期観測［2002 年 12 月～2003 年 11 月］

長期観測では、水温、塩分、溶存酸素、pH、水深は水質計計測によって、流向・流速は電磁流速計を用いて、気温、光量、風向、風速は気象計を用いて計測した。毎月 1 度、これらの機器のデータ回収、校正及びメンテナンスを行った。これらの機器の操作方法について下記する。

３－1－1. 観測機器と操作方法

(1) 水質計と電極の校正

本研究で使用した水質計は、YSI Nanotech Inc.の YSI6 シリーズ多項目水質計(Model:6600)である〔Fig. 2〕。この水質計は、水質計(SONDE)本体記録部とセンサー及び電極部、PC 接続部で構成され、センサーガードカップと保存カップも付属している。センサー及び電極部には、水温センサー、電導度電極、クラーク型ポーラログラフ電極(ラピッドパルス方式)、ガラス複合電極、ステンレス水圧センサーが取り付け可能で、それぞれにおいて水温、塩分、溶存酸素、pH、水深が計測できる。本研究においては最初に述べた 5 つの項目について計測を行った。

水質計計測は過去の研究から継続的に行われているので、採水、データ回収、電極の校正及びメンテナンスの方法の順に述べる〔Fig. 3 参照〕。事前に使用されていなかった場合は、電極の校正及びメンテナンスの順で作業を行えばよい。まず、水質計を海水から引き上げる前に、30 分間隔で 2 度、海水の採水を行う。これは後に得られたデータのドリフト補正(塩分、溶存酸素、pH、全アルカリ度)を行うためである。この操作はデータ回収、校正、メンテナンスを終了した後、再び海水に設置した後にも同じ操作を行う。採水方法及び校正に使用した試薬等については第 4 章実験方法にそれぞれ記す。採水を行った後、水質計を引き上げ真水で洗い付着した汚れを落とし、本体を乾いた布で軽く拭いた。次に本体上部にある PC 通信コネクタに DB-9PC

コネクタを取り付け、PC と通信可能にする。PC 上では操作解析ソフト EcoWatch を開き、そこで計測終了設定を行い、データを回収する。その後、一度水質計と PC の通信を切断し、本体上部にある電池ボックスを開け、アルカリ単二乾電池 8 本を交換する。次に DO 電極膜を取り、電極をキムワイプで拭き、飽和塩化カリウム水溶液で洗浄、同溶液を満たした後、新しい DO 電極膜を貼り付ける。このとき、膜内に気泡が入らないように気をつける。DO 電極膜は YSI Incorporated の YSI MODEL5775 YSI Membrane Kit を使用した。飽和塩化カリウム溶液は YSI Incorporated の専用ボトル O_2 Probe Solution に塩化カリウム(KCl：分子量 74.55)5.25g を入れて蒸留水を約 32ml 加え、完全に溶解させてから使用した。DO 膜を張り替えたら、膜が水に慣れるように 30 分ほど真水につけた。本研究では空気飽和度から計測される溶存酸素(%)について校正を行った。DO 電極の校正は付属の保存カップに水を湿らせたスポンジを入れ、そのカップに電極部を挿入し、カップを水質計(SONDE)本体にはめて飽和になるまで 30 分ほど放置した。このとき、カップ内を大気圧下にするために本体とカップはきつくはめない。その後、PC を作動させて DO 電極の校正を行った。次に pH 電極は保存カップに pH6.863(25℃)、pH4.001(25℃)の標準溶液を入れて、この 2 点で校正を行った。pH 電極の校正は実験室で行う電極校正と同様の操作を行った。だたし、実験室で行う際に用いる溶液の撹拌子について現場では水質計を前後左右に揺すってその替わりとした。

電極の校正が終了したら、計測開始の設定を行い、設定時間に合わせて、前述と同様の採水を 2 度行った。

水質計操作及び電極の校正などの詳細については、「YSI6 シリーズ取扱説明書」を参考にした。

(2) 電磁流速計

本研究で使用した電磁流速計は、アレック電子株式会社の小型メモリー流速計(COMPACT-EM Model:AEM-HR S/N261,262)である〔Fig.4〕。この流速計は、流速計本体記録部とセンサー部から構成されている。記録部は耐圧容器内にあり、そこに PC 通信コネクタと作動確認ランプ、電池挿入部がある。センサー部は流速計上部にあり、流速センサー、水温センサー、流速計内部に方位センサーがある。

流速計の操作及び設定について述べる。まず、電源操作は全て PC 上で行うので、専用の通信ケーブル(9 ピンコネクタ)を PC の RS232C 端子に接続し、通信ソフト WinCEM を立ち上げる。このとき、まだコネクタを流速計に接続しない。「COMPACT-EM データ処理」の画面で「データ転送起動」ボタンをクリックすると、PC と通信ソフトが接続されるので、通信プログラムが起動し、接続時間が画面に記録される。それを確認したらコネクタを流速計記録部内にある PC 通信コネクタに接続し、動作ランプの点灯を確認する。そして画面上の「Wake Up」ボタンをクリックすると流速計記録部と PC が接続される。観測設定は画面上の「設定」ボタンをクリック

して、記録容量(メモリ)の確認、通信ソフトの正確な日時、測定開始時間、測定モード、インターバル設定の順で操作を行った。本研究における測定モードはバーストモード(Burst1)、インターバルは1sec、サンプル数は60(counter)、バースト時間は15min.、ウォームアップは3000mSと設定した。観測開始時刻は必ず設定時よりも後の時刻を設定した。設定後、プログラム操作を終了して、流速計からコネクタをはずすと設定完了となるので、後は測定開始時刻に動作確認ランプの赤色点灯を確認すれば、計測可能となる。

流速計の操作及び設定については、「小型メモリー流速計 COMPACT-EM 取扱説明書」を参考にした。

(3) 気象計

本研究で使用した気象計は、Onset Computer Corporation の HOBO Weather Station〔Fig. 5〕である。この気象計は、気象計本体記録部とセンサー部から構成されている。記録部は気象計中央にある Logger Components 部分に内蔵されていて、そこに PC 通信接続口と作動確認ランプ、電池挿入部がある。センサー部分は、気温・湿度センサー、全日射量センサー、光量子(PAR)センサー、気圧センサー、風向・風速センサー、雨量センサーである。計測はこれらのセンサーを全て用いて行ったが、本研究では気温、光量子、風向・風速、雨量など必要なデータを収集した。

気象計の操作及び設定について述べる。設定は全てPC上で行うので、専用の通信ケーブル(9ピンコネクタ)を PC の RS232C 端子に接続し、コネクタピンは記録部の Logger Components の「Internal Communications Port」に差し込む。そして通信ソフト Box Car Pro 4.3 を立ち上げ、メニューの「Logger」から「Launch」を選択し、Logger Launch 画面を出力させる。その画面上では計測時間などの設定や電池の残量を確認することができる。本研究では気象計の計測設定を YSI 多項目水質計の計測時間に合わせて、[Logging Interval]を 15min.、[Sampling Interval]を 1sec.、[Delayed Start]を水質計メンテナンス日として設定を行った。

データ回収については、メニューの「Logger」から「Readout」を選択する。そのとき、計測の終了について問われるので、計測を終了してから「Readout」を行う。「Readout」したデータは text ファイルにして保存した。

気象計の操作及び設定については、「HOBO ウェザーステーション取扱説明書」を参考にした。

3－1－2. 観測機器の設置方法

長期観測で用いた水質計、流速計、気象計の設置について記す。水質計は、観測海域の沿岸にある桟橋に塩ビのパイプを固定し、そのパイプ内にロープをつけた水質計を通し、海水中に沈めた。ロープは塩ビパイプ上部の錠口に縛った。塩ビのパイプのそこは多数の穴があけられ

ており、海水が流入できるようになっている。流速計は、水質計設置下の海底の地盤にステンレスの杭を 2 本打ち込み、これに巻きつけて固定し設置した。気象計は海域近くの開けた場所で海面から約 10m の場所に設置した。

3－2. 短期観測［2003 年 1 月 19 日～20 日、10 月 23 日～26 日］

短期観測では、塩分、溶存酸素、pH、全アルカリ度は採水によって、海水及び大気の二酸化炭素分圧は非分散赤外線分析装置(NDIR)と平衡器を用いて行った。流向・流速及び気温、光量、風向・風速については長期観測と同じ機器を用いて行ったのでここでは省略する。

観測日時は 2003 年 1 月 19 日 14 時から 1 月 20 日 14 時(24 時間)、2003 年 10 月 23 日 10 時から 10 月 26 日 6 時(70 時間)において、各々2 時間毎に行った。

3－2－1. 採水作業と使用機器

(1) 溶存酸素、塩分、pH、全アルカリ度

溶存酸素、塩分、pH、全アルカリ度は、海水の採水によって、各々の試料を得て、実験室に持ち帰り、精密分析を行った。海水の採水は底にサイフォンを付けたバケツを用いて、事前にとも洗いをして、溶存酸素、pH、塩分、全アルカリ度の順に採水を行った。溶存酸素はウィンクラー法、塩分は電位差分析法、全アルカリ度は Gran plot 法によって分析を行った。各々の採水及び分析方法の詳細については、第 4 章実験方法に記す。

(2) 非分散赤外線分析装置(NDIR)と平衡器

本研究で用いた非分散赤外線分析装置(NDIR: Non Dispersive Infrared Gas Analyzer)は、LI-COR, inc.の LI-6252 CO_2 Analyzer を使用した。この装置は、赤外線光源、レンズ、サンプルセル、リファレンスセル、光センサー素子、光検出器から構成されている〔Fig.6〕。測定原理は、ガスが赤外線光源と光センサー素子を両端に固定したセルの中を流入し、そのとき赤外線を吸収するので、その吸収を検出器で測定し、濃度に換算する方法である。ガスの分子構造によって吸収する赤外線の波長は異なり、二酸化炭素の場合は、赤外線の吸収波長が 4.26×10^{-6} となっている。低濃度ではセル内を通る入射光の減衰は小さく、高濃度では減衰は大きいので、高濃度では赤外線吸収が高い。非分散赤外線分析装置の詳細及び操作については「LI-6252 CO_2 Analyzer INSTRUCTION MANUAL」を参考にした。

NDIR の校正は、観測事前に窒素ガス(pCO_2=0ppm)と二酸化炭素標準ガス(pCO_2=356ppm)を用いて行った。

この装置及び平衡器による観測システムは、〔Fig.7〕に示す。このシステムは、大気と海水の平衡状態をつくり、その大気中での二酸化炭素を NDIR によって計測するという方法である。

観測システムは、NDIR、平衡器ボトル、捕集及び流動ポンプ(Fig.7 PUMP1,2)、乾燥剤(Fig.7 DRIER1,2)、水蒸気捕集フラスコ(Fig.7 TRAP)、海水採水ボトル、大気捕集ボトル、AIR-SEA-NDIR への空気流動切換用三方コックなどで構成されている。平衡器ボトルの中には、ボトル内の海水と空気を平衡状態にさせるための噴水式ポンプ(Fig.7 PUMP3)を取り付けた。流動ポンプは、大気を捕集するためのポンプ(PUMP1)と平衡器の中の二酸化炭素を NDIR へ送り出すためのポンプのような役割を果たすボトル(PUMP2)のことを示す。乾燥剤には塩化カルシウム(DRIER1)と過塩素酸マグネシウム(DRIER2)を使用した。これは NDIR への湿気の流入を防ぐためである。水蒸気捕集フラスコは、乾燥剤に通す前に、流入してきた気体に含まれる水蒸気を冷却捕集するためのものである。この水蒸気捕集フラスコは、観測時には氷の入ったクーラーBOX に入れた。大気捕集ボトルは雨の流入を防ぐように傘のような形を作った。また、二酸化炭素濃度は水温や気温などの温度によって変化するので、平衡器内及び大気捕集ボトルに、温度センサーを取り付けた。

海水及び大気の二酸化炭素分圧の測定方法について述べる。まず、平衡器内の空気を外の大気で満たすために、三方コックを AIR-SEA(NDIR は Close の状態)に接続し、大気捕集用のポンプ(PUMP1)を用いて、大気を平衡器ボトル内に送り込む。このとき、平衡器ボトル上部のフタを軽く開き、気体の流入を可能とさせる。次に、作業現場において、海水成分と同時刻の海水を採水し 20L のタンクにその約半分(10L)入れる。これを実験室に運び、平衡器ボトルの上部のフタを開け、海水を約 9L 移し変える。残りの海水は平衡器内の二酸化炭素を NDIR へ送り出すためのボトル(PUMP2)に入れる。このボトルに海水を移し変える前にボトルの排水口(栓)がしっかり閉まっているか確かめる。平衡器ボトルの中には噴水式ポンプがあるので、このポンプを作動させ、約 30 分、平衡器ボトル内の海水をバブリングして、海水と容器内の空気を平衡状態にした。このとき、平衡器ボトルの空気の出入口が密封されているかを確かめた。平衡器ボトル内をバブリングさせている間は、大気を捕集し、三方コックを AIR-NDIR で接続し、大気の二酸化炭素分圧を計測した。バブリングを終了したら、三方コックを SEA-NDIR(AIR は Close の状態)で接続し、ボトル(PUMP2)の排水口を 30° (全開の 1/12)ほど開き、平衡器内の二酸化炭素を NDIR へゆっくりと送り出した。そして気体と平衡状態にある海水の二酸化炭素分圧を計測した。海水の二酸化炭素は、三方コック切換直後、急激に増加または減少するが約 15 分でその値が一定となるので、このときの値を読み取り、これを観測時の二酸化炭素分圧とした。本研究での二酸化炭素分圧の計測は、PC 通信ポートを使用せずに、目視によって NDIR の計測値表示画面上の値とそのときの時刻を細かく記録した。記録は、三方コックの切換前後の約 20 分間、毎分で行った。

海水の二酸化炭素分圧の計測が終了したら、平衡機内のポンプを止めて、平衡器の排水口から海水を排出させ、三方コックを AIR-NDIR(SEA は Close の状態)に戻し、再び大気の二酸化炭

素分圧を計測した。次の観測もこの操作を繰り返し行った。

3－2－2．採水作業及び機器類の設置場所

短期観測は長期観測における水質計の精密計測を確認するために行うことが目的なので、水質計設置場所である桟橋先端にて採水作業を行った。また、二酸化炭素計測のための非分散赤外線分析装置(NDIR)と平衡器は、瀬底実験所内の実験室に設置した。大気の二酸化炭素捕集口及び気温計は実験室の屋上で海域に近く、開けた場所に設置した。

第６章　群集代謝量の変動

６－1．群集代謝量について

本研究では、瀬底島沿岸海域に生息する生物の炭素生産量を総称して、群集代謝量と呼ぶ。群集代謝量は、植物プランクトンや底棲藻類、サンゴと共生している褐虫藻による光合成や呼吸によって生じる有機炭素生産量(OP: Organic Production)と、有孔虫やサンゴの石灰化や溶解によって生じる無機炭素生産量(IP: Inorganic Production)のことを示す。

有機炭素生産量は全炭酸の変化量あるいは溶存酸素の変化量から、無機炭素生産量は全アルカリ度の変化量から求めることができる。

ここでは有機・無機炭素の生成過程について述べる。

６－1－1．有機炭素の生成過程

光合成及び呼吸によって生産及び消費される有機炭素について述べる。

一般的に光合成とは、葉緑素を持つ植物が光エネルギーを用いて、大気から二酸化炭素 CO_2 を吸収してそれと水 H_2O から有機物を合成し、酸素 O_2 を放出するという反応過程のことである。逆に呼吸とは、体内の有機物をエネルギーとして大気から酸素を吸収し、二酸化炭素を放出する反応過程のことである。各々の反応は、(6-1)もしくはそれを簡略化した(6-2)で表される。

$$6xCO_2 + 6xH_2O \leftrightarrow (C_6H_{12}O_6)_x + 6xO_2 \ (x=1,2,3\cdots) \qquad (6\text{-}1)$$

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow CH_2O + O_2 \qquad (6\text{-}2)$$

光合成によって生産、あるいは、呼吸によって消費される有機炭素は、(6-1) や(6-2)の右辺項にある$(C_6H_{12}O_6)_x$ や CH_2O のことである。

さらにここで、海水中の生物が炭酸系物質を用いて光合成や呼吸を行っていると考えると、(6-2)は次の３つの反応式に分けることができる。

$$CO_2(aqua)^* + H_2O \leftrightarrow CH_2O + O_2 \quad \cdots (6\text{-}3)$$

$$HCO_3^- + H_2O \leftrightarrow CH_2O + O_2 + OH^- \quad \cdots (6\text{-}4)$$

$$CO_3^{2-} + 2H_2O \leftrightarrow CH_2O + O_2 + 2OH^- \quad \cdots (6\text{-}5)$$

(6-3)から(6-5)において、光合成における有機炭素の生産過程で、全アルカリ度や全炭酸、溶存

酸素が炭素生産に与える変化についてみてみる。

まず、前述した全アルカリ度(Total Alkalinity)[第 2 章及び第 4 章参照]を次の式(4-21)に示す。

$$TA = M_{HCO_3^-} + 2M_{CO_3^{2-}} + M_{B(OH)_4^-} + M_{OH^-} - M_{H^+} \qquad (4\text{-}21)$$

有機炭素 CH_2O が 1mol 生成すると炭酸系物質が 1mol ずつ減少する。(6-3)においては、全アルカリ度に影響を与えない炭酸系物質 $CO_2(aqua)*$の減少のみが反応として起こるので、全アルカリ度は変化しない。(6-4)においては、炭酸系物質 HCO_3^-の 1mol 減少と同時に水酸化物イオン OH^-が 1mol 増加する。これによって(4-21)は 1mol の増減が同時に起こるので、全アルカリ度は変化しない。 同様に(6-5)においても、炭酸系物質 CO_3^{2-}の 1mol 減少と同時に水酸化物イオン OH^-が 2mol 増加し、(4-21)では増減の総量は変わらないので、結果として全アルカリ度は変化しない。したがって、有機炭素の生産過程においては全アルカリ度に変化を与えない。

次に、有機炭素の生産過程が全炭酸に与える影響についてみてみる。

前述した全炭酸(Total Inorganic Carbon)[第 2 章参照]を次の式(2-33)に示す。

$$TIC = M_{CO_2(aqua)*} + M_{HCO_3^-} + M_{CO_3^{2-}} \qquad (2\text{-}33)$$

(6-3)から(6-5)のどの反応においても、有機炭素 CH_2O が 1mol 生成すると、炭酸系物質が 1mol 減少し、(2-33)の総量すなわち全炭酸も 1mol 減少するので、有機炭素の生産過程においては全炭酸に変化を与える。

さらに、溶存酸素(Dissolved Oxygen)は、(6-3)から (6-5)のどの反応においても、有機炭素 CH_2O が 1mol 生成すると溶存酸素 DO が 1mol 増加するので、有機炭素が溶存酸素に直接的に変化を与える。

以上のことから、有機炭素生産量は、全炭酸の変化量及び溶存酸素の変化量から求めることができる。

6－1－2. 無機炭素の生成過程

石灰化及び溶解によって生産及び消費される有機炭素について述べる。

一般的に石灰化とは、海水中のカルシウムイオン Ca^{2+}が炭酸系物質 CO_3^{2-}、HCO_3^-と反応し、炭酸カルシウム $CaCO_3$ を生成するという反応過程のことである。逆に溶解とはその炭酸カルシウムが海水中で溶けて炭酸系物質を放出する反応過程のことである。各々の反応は、(6-6)もしくは(6-7)で表される。

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \qquad (6\text{-}6)$$

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + CO_2(aqua)* + H_2O \qquad (6\text{-}7)$$

(6-6)と(6-7)において、石灰化における無機炭素の生産過程で、全アルカリ度や全炭酸の与える

変化についてみてみる。

まず全アルカリ度に与える変化について、(6-6)において、炭酸カルシウム $CaCO_3$ が 1mol 生成すると海水中の炭酸系物質 CO_3^{2-}は 1mol 減少するので、(4-21)に示す全アルカリ度は 2mol 減少する。(6-7)においては、炭酸カルシウム 1mol の生成によって、HCO_3^-が 2mol 減少するのでアルカリ度は 2mol 減少する。よって、炭酸カルシウムが 1mol 生成するとアルカリ度が 2mol 減少する。

次に全炭酸に与える変化について、(6-6)において炭酸カルシウム 1mol の生成に伴い、炭酸系物質 CO_3^{2-}が 1mol 減少し、(2-33) に示す全炭酸は 1mol 減少する。(6-7)においては炭酸系物質 HCO_3^-が 2mol 減少と同時に $CO_2(aqua)^*$が 1mol 生成するので、結果として(2-33) に示す全炭酸は 1mol 減少する。よって、炭酸カルシウムが 1mol 生成すると全炭酸が 1mol 減少する。

以上より、無機炭素生産量は全アルカリ度と全炭酸の変化量から求めることができる。

6－2. 有機・無機炭素生産量の算出法

6-1-1 より、有機炭素生産過程では、全アルカリ度は変化せず、全炭酸 1mol の減少、及び溶存酸素 1mol の生成と同時に有機炭素が 1mol 生成する。

また、6-1-2 より、無機炭素生産過程では、全アルカリ度 2mol と全炭酸 1mol の減少によって無機炭素が 1mol 生成する。

これらのことから、有機炭素生産(OP)、無機炭素生産(IP)、全アルカリ度の変化量(δ TA)、全炭酸の変化量(δ TIC)及び溶存酸素の変化量(δ DO)について、それぞれの関係は次式(6-8) から(6-10)で示すことができる。

$$IP = -\frac{1}{2}\delta TA \qquad (6\text{-}8)$$

$OP + IP = -\delta TIC$　より、

$$OP = \delta - TIC\ \delta\ IP \qquad (6\text{-}9)$$

$$OP = \delta DO \qquad (6\text{-}10)$$

上に述べた生産量の算出法は、大気及び外洋に対して閉鎖的な環境で、さらにその生成過程において生物活動以外の要因で炭酸系物質や pH などの海水成分が変化しないという仮定で成り立つものである。

しかし、本研究において観測している海域は、大気に対しても外洋に対しても開放系であるため、海水は絶えず出入りし、海水成分は変動しつづけている。

大気－海洋間の二酸化炭素フラックスは生産量に比べて、非常に小さいことがわかっている(Kitada, 2003)。

したがって、本研究では、外洋に対する生産量への影響だけを考慮することにした。そのた

めには、水深及び流速を取り入れて生産量を見積る必要がある。そこで生産量を算出するために、観測海域を 1 つの BOX とおいて BOX-MODEL を構築し、その BOX の物質収支を考えることにより生産量の算出を考えた。以下に BOX-MODEL の詳細について記す。

6−2−1. BOX-MODEL の構築

観測海域(瀬底島南東沿岸のサンゴ礁海域)を 1 つの BOX として、その BOX を挟むように流れの上流域を AREA1、BOX 内をサンゴ礁域、下流域を AREA2 として 3 つの部分に分けた(Fig.27)。ここで、流速の時系列変動の結果(第 5 章参照)より、この海域の平均流速は 0.05m/s で、平均流向は 200° であったことから、ほぼ北北東から南南西へ流れているとわかったので、流れの上流を北北東側、下流を南南西側として、島の南東沿岸に沿うような状態で BOX を配置した。BOX を出入りする物質の濃度について、上流域(AREA1)、BOX 内(サンゴ礁域)、下流域(AREA2)の濃度をそれぞれ C_{AREA1}、C_{REEF}、C_{AREA2} と表すと、サンゴ礁内における物質の濃度変化は次式で表される。

$$\delta C_{REEF} = \left(C_{AREA2} - C_{AREA1}\right) \qquad (6\text{-}11)$$

サンゴ礁内の物質の濃度変化は、礁内で水塊が滞留している時に生じるので、濃度変化を滞留時間 τ で割れば、単位時間あたりの物質の増減がわかる(6-12)。

$$\frac{\delta C_{REEF}}{\delta t} = \frac{\left(C_{AREA2} - C_{AREA1}\right)}{\tau} \qquad (6\text{-}12)$$

滞留時間 τ は、BOX(サンゴ礁)の体積 V を、流れの入ってくる面の断面積 S と流速 U の積で割ると求められる。ここで体積 V は、BOX(サンゴ礁)の幅 L_1、BOX(サンゴ礁)の奥行き L_2、高さを水深 d とすると、体積 $V=L_1\times L_2\times d$、断面積 $S=L_2\times d$ となるので、

$$\tau = \frac{V}{S\times U} = \frac{L_1\times L_2\times d}{L_2\times d\times U} = \frac{L_1}{U} \qquad (6\text{-}13)$$

よって、(6-12)及び(6-13)より次式(6-14)で表される。

$$\frac{\delta C_{reef}}{\delta t} = \frac{\left(C_{AREA2} - C_{AREA1}\right)}{\tau} = \frac{\left(C_{AREA2} - C_{AREA1}\right)}{\frac{V}{S\times U}} = \frac{U}{L_1}\times\left(C_{AREA2} - C_{AREA1}\right) \qquad (6\text{-}14)$$

6−2−2. BOX-MODEL を用いた生産量の計算

(1) 有機炭素生産量(OP)の計算

有機炭素生産量(OP)は、溶存酸素の変化量を用いて、BOX-MODEL の計算を行った。溶存酸

素の他に全炭酸の変化量を用いる方法(Smith and Kinsey, 1986)が知られているが、本研究では溶存酸素を現場の実測によって得ているので、これを有機炭素生産量と直接関係しているパラメータとして選択した。

(6-14)を用いて、ある時間 t における有機炭素生産量 OP(t)の計算式(6-15)に示す。

$$OP(t) = \frac{U(t)}{L_1} \times \left\{ DO_{AREA2}(t) - DO_{AREA1}(t) \right\} \qquad (6\text{-}15)$$

ここで DO_{AREA2} は YSI 多項目水質計によって計測された下流域(AREA2)の溶存酸素量(mmol/l)、DO_{AREA1} は上流域(AREA1)の溶存酸素量(mmol/l)である。上流域(AREA1)の溶存酸素は、主に外洋から流入してくる海水と考え、常に飽和の状態であると仮定し、酸素飽和量の値を用いた。酸素飽和量の求め方については第 4 章に詳細を記す。

また、(6-15)の U は水質計の近くに設置された流速計によって計測された流速を用いた。L_1 は瀬底島南東沿岸海域のサンゴ礁の長さを示し、海図からおよそ 800(m)であると判断してこの値を用いた。

(2) 無機炭素生産量(IP)の計算

無機炭素生産量(IP)は、全アルカリ度の変化量を用いて、BOX-MODEL の計算を行った。

(6-14)を用いて、ある時間 t における無機炭素生産量 IP(t)の計算式(6-17)に示す。

$$IP(t) = \frac{U(t)}{L_1} \times \left\{ \left(-\frac{1}{2} \right) \times \left(TA_{AREA2}(t) - TA_{AREA1}(t) \right) \right\} \qquad (6\text{-}17)$$

ここで TA_{AREA2} は下流域(AREA2)の全アルカリ度の値を示し、TA_{AREA1} は上流域(AREA1)の全アルカリ度(μmol/kg)を表す。TA_{AREA2} は YSI 多項目水質計によって計測された下流域の溶存酸素量と pH から計算によって求めた(第 4 章 式 4-40 連続のアルカリ度参照)。

TA_{AREA1} は水温の関数で表される(Chen-Tung, 1979)ので、上流域と下流域の同深の水温は同じであると仮定して、上流域の水温に水質計で計測されている水温を用いて、この関数から計算して求めた(第 4 章 式 4-43, 式 4-44 参照)。

6−3. 炭素代謝量の算出法

本研究で称する炭素代謝量とは、有機炭素生産量から求まる総一次生産量(P_{gross}: Gross Production)、呼吸量(R_{24h}: Respiration for 24 hours/day)、純一次生産量(P_{net}: Net Production)と、無機炭素生産量から求まる純石灰化量(G_{net}: Net Calcification)のことを指す。

6−2−2 の BOX-MODEL によって計算された有機・無機炭素生産量を用いて、一日の炭素代謝量を求める方法(Fig.28, Fig.29)について記す。

6−3−1. 総一次生産量(P_{gross})と呼吸量(R_{24h})

総一次生産量(P_{gross})とは日中の総生産量のことを示し、これには呼吸で消費された生産量も含まれる。光合成によって生成される生産量は、日中の呼吸量を含んでいないみかけの光合成量($P_{app.}$)と呼ばれるものであるため、総一次生産量を求めるときは、日中の呼吸量(R_{photon})を加えた。

また、呼吸量(R_{24h})は、1 日(24 時間)の呼吸を示し、日中と夜間の呼吸速度は同じであると仮定して日中の呼吸量(R_{photon})と 1 日の呼吸量(R_{24h})を求めた。

総一次生産量(P_{gross})を求める方法を Fig.28 に示す。

有機炭素生産量の日変動を示す関数 OP(t)を 1 日ごと分け、さらに昼と夜に分ける。ここで定義する昼は、日の出から日の入りまでの光量がある時間 t_2-t_1 を示し、夜は真夜中 0 時から日の出までの時間 t_1-t_0 と、日の入りから翌日前までの時間 t_3-t_2 を示す。

まず、昼のある時間 t_k と t_{k+1} の間に生産された OP の積算値(Fig.の斜線部分)を求め、それを用いてさらに昼間の積算値を計算した。この OP(t)の総和をみかけの光合成量($P_{app.}$)とした。

次に日中の呼吸量(R_{photon})を求めるために、1 日の呼吸量(R_{24h})を計算した。夜間の OP の平均値を求め、24(時間)倍して 1 日の呼吸量とした。そのとき用いた単位時間の OP 平均値を昼間の時間 t_2-t_1 倍して日中の呼吸量とした。本研究では、真夜中 0 時から日の出までの OP 値の平均値を、これらの呼吸量を求める算出基準とした。

このようにして求めたみかけの光合成量と日中の呼吸量の和が、総一次生産量である。

6−3−2. 純一次生産量(P_{net})

純一次生産量(P_{net})とは昼間に生産された総一次生産量から一日の呼吸量を差し引いた正味の生産量のことをいう。6−3−1 で求めた P_{gross} から R_{24h} を引いて一日の純生産量を求めた。

6−3−3. 純石灰化量(G_{net})

純石灰化量(G_{net})は炭酸カルシウムの昼間に生成される量から夜間に溶解される量を差し引いた正味の石灰化生産量のことをいう。

純石灰化量(G_{net})を求める方法を Fig.29 に示す。

総一次生産量を求めるときと同様、無機炭素生産量の日変動を示す関数 IP(t)を 1 日ごと分け、さらに昼と夜に分ける。

まず昼あるいは夜のある時間 t_k と t_{k+1} の間に生産・溶解された IP の積算値(Fig.の斜線部分)をそれぞれ分けて求め、それを一日ごとに積算した。これによって求めた IP(t)の総和を純石灰化量(G_{net})とした。

6−4. 群集代謝量の時系列変動

群集代謝量(有機・無機炭素生産量)は、BOX-MODEL を用いて生産量を見積もるときに平均

値と実測値の2つのデータセットを作成した。

(a)平均的な群集代謝量

流速は平均流速 0.05m/s を用い、光量の時間区分は、0:00～6:00、6:00～18:00、18:00～0:00とした。

(b)実際の群集代謝量

流速は実測値を用い、光量の区分は、0:00～日の出前、日出後～日の入り、日の入り～0:00とした。

(a)ついては約1年分のデータがあり、2002年12月から2003年11月までの1年間の季節変動を述べるためにこのように作成した。(b)については約6ヶ月分のデータセットがあり、これは流速の観測を約半年しか行っていないため、季節変動を述べるのは難しい。しかし、このデータセットは厳密に群集代謝量を見積もることができると考え作成した。

最初に6－4－1にて平均的な群集代謝量の時系列変動について述べる。

時系列変動(季節変動)は、2002年12月～2003年2月までを冬、2003年3月～5月までを春、2003年6月～9月までを夏、2003年10月～11月までを秋とした。

次に、流速あるいは光量が群集代謝量にどのような変化を与えるかについて 6－4－2 に記述する。この結果を踏まえて、6－4－3 にて、実際の群集代謝量の時系列変動(日変動、季節変動)について記述し、6－4－4 にて、平均的な群集代謝量と実際の群集代謝量の違いについて述べる。

6－4－5にて、群集代謝量と光量の関係について記述する。

群集代謝量に関するグラフ及び測定結果については、本章末に Fig.30～Fig.38、Table16～Table22として示す。

6－4－1. 平均的な群集代謝量

平均的な群集代謝量(光合成量・呼吸量・石灰化量)の結果について以下に記す。流速の平均値と平均的な光量時間で区分した 15 分毎の有機・無機炭素生産量のから、一日における、みかけの光合成量($P_{app.}$)、総一次生産量(P_{gross})、呼吸量(R_{24h})、純一次生産量(P_{net})、石灰化量(G_{net})を求めた。これら群集代謝量の季節変動を Fig.33～35 に示す。

総一次生産量は、冬に-174.5～692.7mmol/m^2/day(平均 295.7mmol/m^2/day)、春に 88.5～722.7mmol/m^2/day(平均374.6mmol/m^2/day)、夏に18.6～871.6mmol/m^2/day(平均468.1mmol/m^2/day)、秋に 170.5～786.6mmol/m^2/day(平均 455.9mmol/m^2/day)であった。冬から春でやや減少、夏に向けて増加、秋には減少傾向が見られた。2003 年 2 月の急激な減少は、同時期に 2℃以上の水温の低下と、溶存酸素量が通常の日変動幅(0.4meq/l)よりも小さかった日が 2 月に多かったことが

原因であると考えられる。水温の 2℃以上の低下で、総一次生産量は約 100mol/m^2/day 減少し、溶存酸素量の日変動幅が通常よりも小さいときは約 300mol/m^2/day 減少した。

呼吸量は、冬に 199.0 ～ 635.0mmol/m^2/day (平均 233.7mmol/m^2/day)、春に 267.1 ～ 576.2mmol/m^2/day(平均 425.7mmol/m^2/day)、夏に 102.5 ～ 1303.8mmol/m^2/day(平均 562.6mmol/m^2/day)、秋に 142.7～1020.8mmol/m^2/day(平均 526.4mmol/m^2/day)であった。冬、春はほぼ一定、夏に急激に増加した。2002 年 12 月と 2003 年 9 月の急激な減少は、総一次生産量の減少(2003 年 2 月)と同様、水温と溶存酸素量の変動が通常値と異なることが原因であると考えられる。

一日の生産量収支(純一次生産量)は、冬に-174.8～295.7 mmol/m^2/day (平均 102.1mmol/m^2/day)、春に 89.2～154.5mmol/m^2/day (平均 112.0mmol/m^2/day)、夏に-104.9～335.5mmol/m^2/day (平均 42.4mmol/m^2/day)、秋に-218.2～77.3mmol/m^2/day (平均-70.45mmol/m^2/day)であった。冬から春、夏、秋に向けての呼吸量の増加により、生産量収支も小さくなっている。

石灰化量は、(1)における無機炭素生産量の結果より、正確に見積もることはできなかったので、毎月の水質計メンテナンス時に得る全アルカリ度の手分析結果から、平均的な石灰化量を見積った。その方法は、得られる全アルカリ度の 4 つのデータの各時間変化量を積算して、単位時間当たりの全アルカリ度を求め、それを 24(時間)倍して石灰化量とした。冬に 100.1～144.7 mmol/m^2/day(平均 125.0mmol/m^2/day)、春に 150.6～349.4mmol/m^2/day(平均 273.6mmol/m^2/day)、夏に 250.7～470.3mmol/m^2/day(平均 375.3mmol/m^2/day)、秋に 358.4～394.6mmol/m^2/day (平均 376.5mmol/m^2/day)であった。冬から春、夏、秋に向けて石灰化量が増加の傾向が見られた。

光合成量(総一次生産量)、呼吸量、石灰化量の季節変動を比較すると、光合成量は一年を通してほぼ一定であるのに対し、呼吸量、石灰化量は、春から夏に向けて増加の傾向を示した。

光合成量(総一次生産量)に対する呼吸量の割合(P_{gross}/R_{24h} 比)を求めることは、サンゴ礁生態系が独立栄養摂取なのか、何らかの生物に従属栄養摂取なのかがわかる。その P_{gross}/R_{24h} 比は、冬に 0.4～3.6(平均 1.9)、春に 1.3～1.7(平均 1.4)、夏に 0.8～3.4(平均 1.5)、秋に 0.7～1.2(平均 1.0)であった(Fig34)。冬は光合成に対して呼吸量が小さく、春、夏、秋に向けて呼吸量が大きくなるため、秋には、光合成と呼吸量がほぼ等しくなっている。

一日の生産量収支(純一次生産量)に対する石灰化の割合(P_{net}/G_{net})を求めることは、光合成量や呼吸量、石灰化量の変動の大きさがわかるだけでなく、二酸化炭素の収支がわかる。

サンゴ礁では、光合成によって有機物の生成に伴い、二酸化炭素が吸収され、石灰化による炭酸カルシウムの生成に伴い、二酸化炭素が放出される働きがある。そのため、純一次生産量(P_{net})

と石灰化量(G_{net})の割合によって、二酸化炭素の吸収と放出がわかる。二酸化炭素の吸収と放出のしきい値は、加納(1990)ににによって示された「光合成と石灰化が同時に生じたときの炭酸系化学種の平衡計算」と、Ware et al.(1992)によって示された「$P_{net} : G_{net} = 0.6 : 1$ のとき、二酸化炭素は吸収も放出もなく、P_{net} がこれよりも大きければ、二酸化炭素を吸収し、G_{net} が大きければ二酸化炭素を放出する」という数値実験値を引用して、$P_{net}/G_{net} = 0.6$ とした。

Fig.35 より、$P_{net}/G_{net} = 0.6$ を境として、冬は呼吸量や石灰化量に対して光合成が高いため、瀬底島サンゴ礁生態系では、二酸化炭素の潜在的な吸収源となっているが、春、夏、秋に向けて、呼吸量と石灰化量の増加に伴い、二酸化炭素の放出源になることがわかった。

6−4−2. 有機・無機炭素生産量と流速の関係

BOX-MODEL の計算過程の中で、流速を一定あるいは変化させると有機・無機炭素生産量がどのくらい変化するかを確かめた。

計算に必要なパラメータの初期値は、水温 25℃、塩分 34.000、pH8.3、溶存酸素 1meq/l、全アルカリ度 2300 μ mol/kg、水深 2m とした。結果を Table16 に示す。

Table 16 Results of IP and OP calculated by changing current speed

Current Speed (m/s)	IP ($mmol/m^2/min.$)	OP ($mmol/m^2/min.$)
0.05	0.021	0.282
0.06	0.025	0.340
0.07	0.029	0.396
0.08	0.033	0.453
0.09	0.036	0.511
0.10	0.041	0.567

Table 16 より、流速を 0.01m/s(1cm/s)変化させるだけで、有機炭素生産量は±0.057～0.058mmol/m^2/min.(±3.42～3.48 mmol/m^2/h)、無機炭素生産量は±0.003～0.004 mmol/m^2/min. (0.18～0.24 mmol/m^2/h)だけ増減することがわかった。これらの値は、OP の 13～21%、IP の 11～18%を占めるため、流速の変化は生産量変化に比較的大きな影響を与えているという結果が得られた。

6−4−3. 実際の群集代謝量

実際の群集代謝量(光合成量・呼吸量・石灰化量)の結果について以下に記す。流速の影響が大きいことから、より厳密な代謝量を算出するために、実測の流速と現場の光量の時間区分の

データセットを用いた。このようにデータを作成した 15 分毎の有機・無機炭素生産量のから、一日における、みかけの光合成量($P_{app.}$)、総一次生産量(P_{gross})、呼吸量(R_{24h})、純一次生産量(P_{net})、石灰化量(G_{net})を求めた。これら群集代謝量の季節変動を Fig.33～35 に示す。

手分析のデータによる光合成量と呼吸量の日変動は、冬(2003 年 1 月 19 日～20 日)に比べて光量の高い秋(2003 年 10 月 23 日、24 日、25 日)のほうが高い。光量によって、一次生産量(光合成量)及び呼吸量が変化していることがわかる。また、総一次生産量と呼吸による P/R 比は、1.1～1.5 を示していることから、光合成による総一次生産量は、呼吸による消費量より高く、一日の生産量収支(純一次生産量)は 20～80 mmol/m^2/day であった。

手分析と水質計データを用いて計算した結果は、±20～50mmol/m^2/day の差はあるが、10/23 の純一次生産量を除いてほぼ同じ値を示したので、ほぼ正確に見積もることができると考えられる。

総一次生産量は、冬に 168.2～497.9mmol/m^2/day (平均 320.1mmol/m^2/day)、春に 126.4～825.3mmol/m^2/day(平均 399.9mmol/m^2/day)、初夏に 97.114 ～ 450.0mmol/m^2/day(平均 226.8mmol/m^2/day)、秋に 196.4～736.3mmol/m^2/day(平均 425.3mmol/m^2/day)であった。冬から春に向けて増加し、初夏に減少、秋に増加した。冬(1 月)、初夏(5 月)が春に比べてやや低いのは、観測時の光量が全体的に低かったからであると考えられる。

呼吸量は、冬に 56.7 ～ 260.1mmol/m^2/day (平均 119.5mmol/m^2/day)、春に 87.1 ～ 487.1mmol/m^2/day(平均 244.4mmol/m^2/day)、初夏に 15.9 ～ 256.1mmol/m^2/day(平均 107.5mmol/m^2/day)、秋に 300.4～802.7mmol/m^2/day(平均 518.0mmol/m^2/day)であった。冬から春にかけて増加、初夏に減少するが秋は増加の傾向が見られた。この変動も総一次生産量と同様、光量が標準値より低かったことが原因と考えられる。

一日の生産量収支(純一次生産量)は、冬に 200.6mmol/m^2/day、春に 160.0mmol/m^2/day、夏に 119.3mmol/m^2/day、秋に-185.4mmol/m^2/day であった。冬から春、夏、秋に向けての呼吸量の増加により、生産量収支も小さくなっている。平均的な群集代謝量(6－4－1 (2))と同様の結果が得られた。

石灰化量は、冬に-240.9 ～ 350.2mmol/m^2/day (平均 140.4mmol/m^2/day)、春に-422.3 ～ 350.7mmol/m^2/day (平均-86.35mmol/m^2/day)、初夏に-560.4 ～ 222.0mmol/m^2/day (平均-76.2mmol/m^2/day)、秋に-295.9～338.5mmol/m^2/day (平均 32.1mmol/m^2/day)であった。(1)における無機炭素生産量を用いて計算したので、
冬から春、初夏に向けて減少し、負の値が得られ、秋に増加して正の値が得られた。平均的な

群集代謝量(6－4－1(1) (2))と同様、無機炭素生産量及び石灰化量の見積もりは不十分であったと考えられる。

光合成量(総一次生産量)、呼吸量、石灰化量の季節変動を比較すると、光合成量と石灰化量の変化に対し、呼吸量の変化が秋に向けて増加の傾向を示した。

光合成量(総一次生産量)に対する呼吸量の割合(P_{gross}/R_{24h} 比)は、冬に 2.7、春に 1.7、初夏に 2.1、秋に 0.8 であった。冬は生産量に対して呼吸量が小さく、春に向けて呼吸量の増加によって P/R が減少した。初夏は、生産量に対して呼吸量が小さかったので P/R 比が増加したが、秋に向けて呼吸量が大きくなり、生産量と呼吸量がほぼ等しくなったと考えられる。

一日の生産量収支(純一次生産量)に対する石灰化の割合(P_{net}/G_{net})は、ここでの石灰化量が正確に見積もることができなかったので得ることができなかった。

有機炭素生産量の日変動は、日中から日の入り前まで増加、日の入り後減少し、日の出後再び増加した。これは、有機炭素生産量が溶存酸素量の変化量から見積もられているため、溶存酸素の日変動と同じ変化が見られたと考えられる。日変動のデータより、光合成による有機炭素の最大生産は、光のある昼間 12:00～16:00 に、呼吸による有機炭素の最大消費は、光のない夜間 4:00～6:00 にあることがわかった。

無機炭素生産量の日変動は、より精密な採水による手分析のデータを用いたときでは、日中から日の入り前まで増加(石灰化)、日の入り後、減少(溶解)した。これに対して、水質計計測の連続データにおいては日中に増加(石灰化)、日の入り後は一度減少してその後再び増加するという結果が得られた。これは、第 5 章で述べたように、手分析と水質計より計算で求めた全アルカリ度の違いにより生じた結果である。日中に関しては、採水による実測と同じような結果が得られていることから、この値を用いて昼間の無機炭素生産量を求めた。日変動のデータより、光量による石灰化の最大生産量は、昼間の 14:00～16:00 で起こることがわかった。

6－4－4. 平均的な群集代謝量と実際の群集代謝量の比較

有機炭素生産量は、(a)平均的な群集代謝量と(b)実際の群集代謝量の結果を比較すると、(a)のほうが少し値は大きいがほとんど変わらないことがわかる。

無機炭素生産量は、(a)と(b)で同じ季節変動を示したが、生産量を見積もるにはどちらも不十分であった。これは計算に用いた全アルカリ度の値が正確に計算されていなかったと考えられ、再度検討する必要がある。

光合成量(総一次生産量)は、春と秋の絶対値がほぼ同じであるが、冬と夏(初夏)に関しては異なる。冬は(b)におけるデータの数が少なかったこと、夏(初夏)は(a)と(b)での季節の定義が異なることと、期間の長さが異なることが差異の要因であると考えられる。

呼吸量及び生産量収支(純一次生産量)については、それらの絶対値がともに 100mmol/m^2/day ほど異なるが、増減傾向は同じであった。

これらのことから、有機炭素生産量はほぼ正確に見積もられているが、無機炭素生産量は、全アルカリ度の計算過程と BOX-MODEL の再検討の必要がある。

6−4−5. 一次生産量(光合成量・呼吸量)と光量の関係

光合成によって生成されるサンゴの一次生産量は、光量に比例して指数関数的に増加することが知られ、次式(6-25)の曲線で表される(Chalker 1983, Gattuso et al. 1993, Fujimura 2001)。

$$P = a \times \left\{1 - \exp\left(-\frac{x}{b}\right)\right\} + c \qquad (6\text{-}25)$$

ここで、P は一次生産量、x は光量、a, b, c は係数である。a は、光量に対して P が飽和の状態に達したとき、曲線に対して水平方向に描かれる漸近線で、みかけの最大生産量($P_{app.}$-max)を表す。b は、光量がない(x = 0)ときの曲線の傾きが漸近線との交わる点での光量を表す。すなわち、最大生産を行うために必要な最低光量のことである。c は、日中の呼吸量(R_{photon})を表し、本研究では昼間と夜間の呼吸速度は変化しないという仮定のもと、夜間の単位時間あたりの呼吸量を光量のある時間分だけ倍した値を意味する。また、a と c の差(a−c)は、光合成による最大総一次生産量($P_{gross.}$-max)を示す。

BOX-MODEL による炭素生産量計算とデータセットの作成が、より正確に生産量を表現できているかを確認するために、6−4−2 で用いた有機炭素生産量から求めた一次生産量と、光量の関係について次に記す。

先述と同様、冬を 1 月、春を 3〜4 月、初夏を 5 月、秋を 10〜11 月とする。

得られた結果より、一次生産量と光量の関係は指数関数のように変化する傾向が見られたので、それぞれ(6-25)で示される曲線式を求めた。その結果が次のようになった。

≪冬≫

$$1\text{月}: Y = 322.8 \times \left\{1 - \exp\left(-\frac{x}{2.5}\right)\right\} - 53.9 \qquad (6\text{-}26)$$

≪春≫

$$3\text{月}: Y = 561.3 \times \left\{1 - \exp\left(-\frac{x}{12.9}\right)\right\} - 122.1 \qquad (6\text{-}27)$$

$$4\text{月}: Y = 447.3 \times \left\{1 - \exp\left(-\frac{x}{12.9}\right)\right\} - 126.8 \qquad (6\text{-}28)$$

≪初夏≫

$$5\text{月}：Y = 267.3 \times \left\{1 - \exp(-\frac{x}{13.2})\right\} - 14.3 \qquad (6\text{-}29)$$

≪秋≫

$$10\text{月}：Y = 451.4 \times \left\{1 - \exp(-\frac{x}{1.9})\right\} - 248.8 \qquad (6\text{-}30)$$

$$11\text{月}：Y = 468.6 \times \left\{1 - \exp(-\frac{x}{10.3})\right\} - 245.8 \qquad (6\text{-}31)$$

(6-26)から(6-31)に示される(6-26)の係数 a, b, c に値する部分は、1 ヶ月ごとの平均的なみかけの最大光合成量($P_{app.}$-max)、最大生産に必要な最低光量(Photon-min.)、日中の呼吸量(R_{photon})である。

最大生産に必要な光量は、冬から初夏に向けて増加、秋にやや減少傾向にあった。10 月の b 値が小さいのは、10 月に観測された実際の光量が 20mmol/m^2/day 以上であったため、生産に必要な厳密な光量を求められなかったと考えられる。

日中の呼吸量は、実際の分布から得られた結果(Table22)と比較すると、ほとんど同じ値を示した。

これらの結果より、実際の光合成量、呼吸量は、冬から初夏にかけて生産量と光の指数曲線に沿って変化することがわかった。しかし、秋に最大生産量に対して実際の値が小さいのは、実際の値に光量が弱いときの群集代謝量を含み平均した値を用いたためである。

6－4－6. 群集代謝量変動のまとめ

瀬底島沿岸海域の群衆代謝量の時系列変動について以下のことが明らかになった。

(1) BOX-MODEL を用いた有機炭素生産量の算出は、ほぼ正確に見積もることができたが、無機炭素生産量の算出は、全アルカリ度の計算過程と BOX-MODEL を再検討する必要がある。

(2) 平均的な群集代謝量(光合成・呼吸・石灰化)について、光合成量は一年を通してほぼ一定を示したが、呼吸量と石灰化量は、春から夏に向けて増加した。

(3) 平均的な光合成量(総一次生産量)に対する呼吸量の割合(P_{gross}/R_{24h} 比)が、冬から春、夏に向けて大きくなった。特に顕著に現れた 2002 年 12 月、2003 年 2 月、9 月は、溶存酸素の変動が通常値 0.4meq/l より小さい 0.01～0.2meq/l の変動であったことと、2℃以上の水温の

低下の 2 つの変化が 10～15 日見られたことが、これら各月の光合成能力の低下と呼吸能力の増加を引き起こした。

(4) 平均的な一日の生産量収支(純一次生産量)に対する石灰化の割合(P_{net}/G_{net})が、光量の高い夏に向けて大きくなり、高水温、高光量により生物群集の代謝活動が活発となったことを示した。

(5) (a)平均的な群集代謝量(平均流速・平均光量時間)と(b)実際の群集代謝量(流速(実測値)・実際の光量時間)で分けたときでは、一日の有機炭素生産量はほとんど同じ値を示したが、光合成量及び呼吸量では(b)の方法で見積もったほうが、生産量と光の関係が厳密に求めることができた。

(6) BOX-MODEL と、流速(実測)、光量時間の厳密なデータセットによって求めた有機炭素生産量は、光量との指数関数的な変化を示したので、この解析方法は適切に群集代謝量を算出できた。

第 7 章　瀬底島サンゴ礁海域の二酸化炭素と群集代謝量

この章では、7－1 にて、前章までに述べた環境因子、二酸化炭素、群集代謝量の結果を用い、2002 年から 2003 年までの約 1 年間における瀬底島サンゴ礁海域の群集代謝量についてまとめる。また、他のサンゴ礁海域での群集代謝量との比較を行う。7－2 では、1 年を通した瀬底の生物群集による代謝活動と環境変動について記述する。

7－1. 他のサンゴ礁海域との群集代謝量の比較

2002 年 12 月から 2003 年 11 月の約 1 年間の群集代謝量(石灰化量、光合成量(総一次生産量)、呼吸量)の季節変動を Fig. 39 及び Table23 に示す。

これらの群集代謝量を積算した結果、瀬底島サンゴ礁海域に生息する生物群集の代謝活動は、1 年間で、石灰化量が 105molC/m^2/year、光合成量(総一次生産量)が 150molC/m^2/year、呼吸量が 129molC/m^2/year、生産量収支(純一次生産量)が 21molC/m^2/year であった。光合成量(総一次生産量)に対する呼吸量の割合(P_{gross}/R_{24h})は、1.2 であった。生産量収支(P_{net})に対する石灰化量の割合(P_{net}/G_{net})は、0.2 であった。これらの結果から、この 1 年間を通して、瀬底島サンゴ礁海域における生物群集による代謝活動は、呼吸よりも光合成がやや卓越していた。しかし、光合成と石灰化の関係より、瀬底島サンゴ礁海域では二酸化炭素が放出の傾向にあることを示した。

このような瀬底島サンゴ礁海域と、他のサンゴ礁海域の群集代謝量を Fig.40 にて比較する。

瀬底島サンゴ礁海域は、2000～2001 年において総一次生産量、呼吸量、石灰化量は夏に増加し、冬に減少する傾向が見られたことが報告されている(Kitada, 2002)。また、白保サンゴ礁海域においても同じような季節変動が見られ、P_{gross}/R_{24h} 比が 1.1(Nakamori et al., 1992)、1.4(Suzuki et al., 1995)という結果が報告されている。

自然環境の複雑因子を単純化したシステムであるサンゴ礁メソコズムでは、自然のサンゴ礁生態システムに比べ、呼吸量よりも光合成による有機物が過剰に生産され、P_{gross}/R_{24h} 比が 1.4～1.9 と高い値を示すことが報告されている(Fujimura, 2001)。

その他のサンゴ礁海域においても総一次生産量、呼吸量、石灰化量は異なるものの、P_{gross}/R_{24h} はほぼ 1.0～1.3 を示している。

これらのことから、瀬底島サンゴ礁海域は 2000 年、2001 年と比べて、2003 年は生物群集による代謝活動が同じくらい行われていて、特に光合成(総一次生産)に対して、呼吸量と石灰化量が盛んであった。また、他の海域と比べると、観測された季節は異なるが、ほぼ同じ群集代謝量を示していることから、瀬底島サンゴ礁海域に生息する生物群集は、他のサンゴ礁海域と同じ生産能力を有すると考えられる。

沖縄県瀬底島サンゴ礁海域における群集代謝量の動態解析

九州大学大学院総合理工学府　　渡慶次　亮子

1. 緒言

サンゴ礁は生物の多様性に富み、一日の生物活動の中で光合成による有機炭素生産や石灰化による無機炭素生産を行っている。同時に二酸化炭素を吸収あるいは放出している。そのため、サンゴ礁生態系の炭素生産は非常に高く、地球規模の炭素循環に寄与する役割として重要である。

サンゴ礁海域の炭素循環に関する研究は、太平洋やインド洋などの亜熱帯海域を中心に、外洋に対して閉鎖系環境にある環礁や堡礁で多く行なわれている。このような海域では、光合成による有機炭素生産量と呼吸量がほぼ等しく、サンゴ礁における二酸化炭素の放出と吸収は、石灰化速度で決まり、ほとんどのサンゴ礁で二酸化炭素が放出されている(Gattuso, 1996)。それに対し、外洋に対して開放系環境にある裾礁では、大気や陸域だけでなく外洋からの海水流入の影響によって、炭素循環過程が非常に複雑となる。このような環境下では、潮の干満を利用した観測や、連続的な観測システムを用いて炭素生産量を見積もるという研究が進められているが、連続的かつ長期的な観測を行うことは非常に困難である。また、同じ裾礁型のサンゴ礁海域においても周辺環境が異なるために、炭素生産量の見積もりや二酸化炭素の挙動に対する意見は様々である。加えて、周辺環境も長期的に変動しているため、炭素循環に関する研究を評価するには、さらなる観測と結果など多くの情報が求められる。

本研究では、裾礁型サンゴ礁海域において、二酸化炭素や有機・無機炭素生産量を定量的に評価するために、モデルによる炭素生産量の見積もりと数値解析を行った。

2. 海洋観測とボックスモデル

沖縄県瀬底島南東沿岸のサンゴ礁海域（Fig.1）を対象として、2002 年 12 月から 2003 年 11 月まで観測を行った。観測は多項目水質計(Model:6600,YSI Nanotech Inc.)、流速計 (COMPACT-EM) 、気象計 (HOBO Weather Station)を設置して、水温、塩分、溶存酸素、pH、水深、流向・流速、気温、光量、風向・風速を 15 分毎に計測した。炭酸系化学種の平衡式を用いて、DO-pHから連続のアルカリ度を、pH-アルカリ度から二酸化炭素分圧（pCO_2）を計算した。

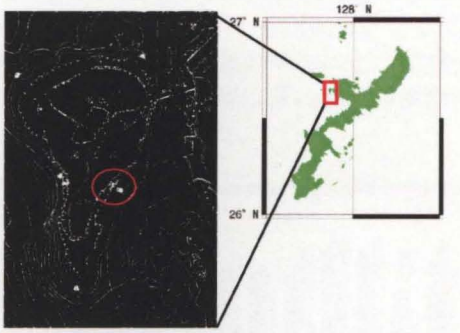
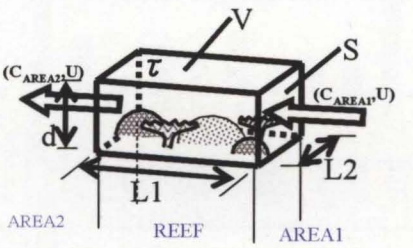


Fig.1 Sampling location at Sesoko Is. in Okinawa.

炭素生産量（群集代謝量）を定量的に求めるために、観測海域を出入りする物質収支を用いたボックスモデル（Fig.2）を構築した。



$$\frac{dC_{REEF}}{dt} = \frac{(C_{AREA2} - C_{AREA1})}{\tau} \qquad \tau = \frac{V}{S \times U} = \frac{L1 \times L2 \times d}{L2 \times d \times U} = \frac{L1}{U}$$

C_{AREA1}, C_{AREA2} : Concentration of a chemical inflowing to box or outflowing from box

τ : Residence time　　S : Cross section of flowing area

V : Volume of box　　U : Speed of inflow and outflow

Fig.2 Box model

ボックスモデルは、瀬底島南東沿岸海域を上流域（AREA1）、サンゴ礁域（REEF）、下流域（AREA2）の 3 つに分け、上流域と下流域の物質の濃度差を滞留時間で割ることでサンゴ礁域内の生産量の物質収支を得

た。有機炭素生産量は溶存酸素の差を用いて、無機炭素生産量はアルカリ度の差を用いて、物質収支を求めた。上流域の溶存酸素は飽和の状態にあると仮定し、水温と塩分から酸素飽和量を計算し、アルカリ度は水温の関数から求めた。下流域の溶存酸素とアルカリ度は水質計のデータを用いた。滞留時間は、海図よりサンゴ礁の長さを800m と判断して、流速で割ることによって求めた。

3. 結果・考察

3-1. 調査海域の環境と二酸化炭素変動

二酸化炭素濃度の変動は、冬に 200～800ppm と大きく、春に向けて 200～400ppm と小さくなり、夏に向けて 200～600ppm と再び大きくなった。二酸化炭素変動の周期解析の結果、冬に振幅が大きいのは短周期変動の影響であることが示唆された。短周期の効果を除いた二酸化炭素濃度は、冬に 200～400ppm と小さくなった。また、冬から春にかけて低く、夏に高い傾向を示した (Fig.3)。

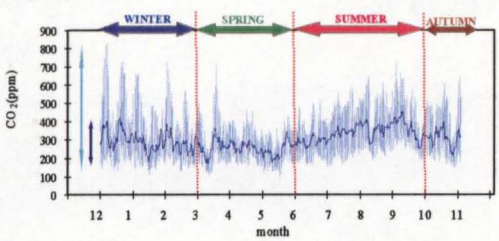


Fig.3 Seasonal variation of concentration of CO_2 in seawater.

－CO_2 before removal tidal effects
－CO_2 after removal tidal effects

3-2. 有機炭素・無機炭素生産量の変動

有機炭素の生産を示す光合成量(P_{gross})、消費を示す呼吸量(R_{24h})、無機炭素の生産を示す石灰化量(G_{net})の時系列変動をFig.4 に図示する。光合成量は 2 月を除くと、1 年を通してほぼ一定を示した。これに対し、呼吸量と石灰化量は 9 月を除くと、春から夏に向けて増加の傾向を示した。

次に、光合成による有機炭素の生産と呼吸による消費の頻度を確かめるために、光合成量に対する呼吸量の割合 (Fig.5-a) を求めた。夏に向けて光合成よりも呼吸の影響を受け、1 に近づくことがわかった。

炭素生産量から二酸化炭素の放出・吸収を調べるために、光合成量から呼吸量を差し引いて求められる正味の生産量と石灰化量の割合 (Fig.5-b) を求めた。この比率が 0.6 に等しいとき、二酸化炭素は海水に吸収も放出もされず、0.6 より大きいときは海水に吸収され、小さいときは放出される (Ware et al., 1992)。冬から春にかけて 0.6 に近づき、夏に向けて 0.6 より小さくなった。Fig.4 より、夏に向けて増加する石灰化量に対して、正味の生産量は呼吸量の増加によって減少するため、二酸化炭素は夏に放出の傾向にあることが示唆された。

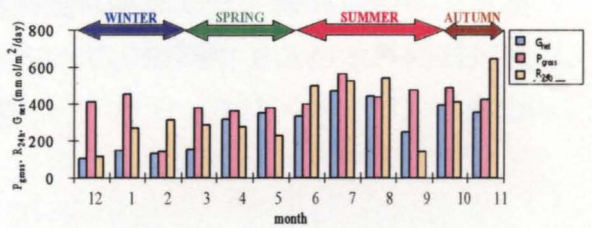


Fig.4 Seasonal variation of the community metabolism from December 2002 to November 2003 at Sesoko Is. in Okinawa.

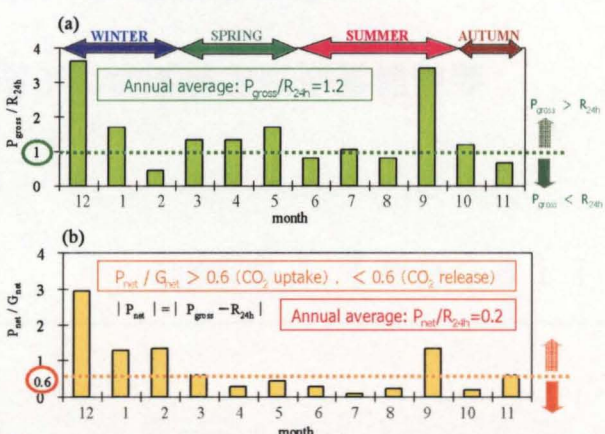


Fig.5 Seasonal variation of ratio for each community metabolism from December 2002 to November 2003 at Sesoko Is. in Okinawa.

4. 結論

瀬底島サンゴ礁海域の群集代謝量の動態は、夏に向けて高くなり、光合成よりも呼吸と石灰化が盛んに行われていた。このような生物群集による代謝活動が、夏の二酸化炭素の増加に影響を与えていることが示唆された。